

533, 813

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



Rec'd PCT/PTO 02 MAY 2005



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
13. Mai 2004 (13.05.2004)

PCT

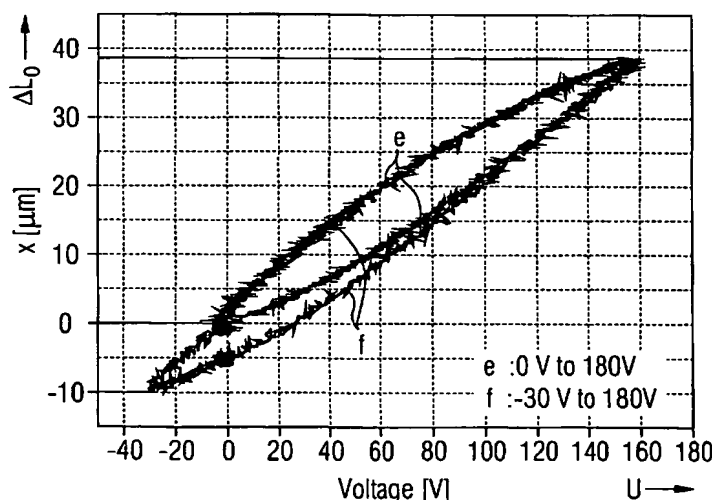
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2004/040112 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: F02D 41/20 (72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): KAPPEL, Andreas [DE/DE]; Zugspitzstr. 7, 85649 Brunnthal (DE).  
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2003/002931 GOTTLIEB, Bernhard [DE/DE]; Elfenstr. 16, 81739 München (DE). SCHWEBEL, Timo [DE/DE]; Kitzenmarkt 24, 86150 Augsburg (DE). FISCHER, Bernhard [DE/DE]; Paracelsusstr. 6, 84513 Töging A. Inn (DE).  
(22) Internationales Anmeldedatum: 3. September 2003 (03.09.2003) BACHMAIER, Georg [DE/DE]; Thierschstr. 40, 80538 München (DE).  
(25) Einreichungssprache: Deutsch (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch (74) Gemeinsamer Vertreter: SIEMENS AKTIENGESSELLSCHAFT; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).  
(30) Angaben zur Priorität: 102 50 917.4 31. Oktober 2002 (31.10.2002) DE (81) Bestimmungsstaaten (national): JP, US.  
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): SIEMENS AKTIENGESSELLSCHAFT [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE). (84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: OPERATING METHOD FOR A HYDRAULIC INJECTION VALVE COMPRISING A PIEZOELECTRIC ACTUATOR AND A CONTROL UNIT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BETRIEB EINES HYDRAULISCHEN EINSPRITZVENTILS MIT EINEM PIEZOELEKTRISCHEN AKTOR SOWIE STEUERGERÄT



(57) Abstract: The invention relates to a method and a control unit for operating a hydraulic injection valve which comprises at least one piezoelectric actuator (2), a displaceable component (3) and a hydraulic element (9) such as a bearing or a transmission system. The use of a drive voltage (U) modifies the length of an actuator (2) which makes it possible to control the stroke of the displaceable component (a valve needle 3). The inventive control unit (10) produces a polarising voltage (UB) which prestresses the actuator (2) and whose polarisation direction is opposite to the polarisation direction of said actuator (2). Said invention makes it possible to obtain the greater modification of the length when the actuator (2) operates in the polarisation direction than the drive voltage starts at 0 volts, as it was in practice before. Said invention makes it possible to reduce energy consumption.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/040112 A1

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

---

**(57) Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Verfahren beziehungsweise ein Steuergerät (10) zum Betrieb eines hydraulischen Einspritzventils, das wenigstens einen piezoelektrischen Aktor (2), ein zu bewegendes Bauteil (3) und ein hydraulisches Element (9) wie Lager oder Übertrager aufweist. Durch Anlegen einer Steuerspannung (U) wird eine Längenänderung des Aktors (2) bewirkt, mit der der Hub des zu bewegendes Bauteils (Ventilnadel 3) gesteuert wird. Erfindungswesentlich ist dabei, dass das Steuergerät (10) eine Biasspannung (UB) erzeugt, die den Aktor (2) vorspannt, wobei deren Polungsrichtung entgegengesetzt ist zur Polungsrichtung des Aktors (2). Dadurch wird bei Ansteuerung des Aktors (2) in Polungsrichtung in vorteilhafter Weise eine größere Längenänderung erreicht, als wenn - wie bisher üblich - die Steuerspannung bei 0 Volt beginnt. Ein weiterer Vorteil besteht auch darin, dass sich der Energieverbrauch reduziert.

## Beschreibung

Verfahren zum Betrieb eines hydraulischen Einspritzventils mit einem piezoelektrischen Aktor sowie Steuergerät

5

Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zum Betrieb eines hydraulischen Einspritzventils (Injektors), das wenigstens mit einem piezoelektrischen Aktor, mit einem zu bewegenden Bauteil und mit einem hydraulischen Element ausgebildet ist und die in einem gemeinsamen Gehäuse angeordnet sind, wobei durch Anlegen einer Steuerspannung an den Aktor der Hub des zu bewegenden Bauteils reversibel steuerbar ist, beziehungsweise von einem Steuergerät nach der Gattung der nebengeordneten Ansprüche 1 und 7. Es ist schon bekannt, zur Steuerung eines Einspritzventils, insbesondere für die Kraftstoffeinspritzung in einen Verbrennungsmotor, einen piezoelektrischen Aktor zu verwenden, der mit einer seiner Polungsrichtung entsprechenden Steuerspannung betrieben wird. Dabei nutzt man beispielweise zur direkten Betätigung einer Ventilnadel des Einspritzventils die Längenänderung aus, die der Aktor durch die angelegte Steuerspannung vollzieht. Bei der indirekten Nutzung wird dagegen die Ventilnadel durch Aufstoßen eines Absteuerventils (Servoventils) geöffnet.

Die Längenänderung (Elongation) ist vom physikalischen Prinzip her eine sehr kleine Größe. Um eine nutzbare Längenänderung zu erzielen, wurden beispielsweise vielschichtige Aktoren wie PMA (Piezo-elektrischer Multilayer Aktor) entwickelt und die angelegte Steuerspannung möglichst hoch, zum Beispiel 160V gewählt. Dennoch beträgt die Längenänderung eines solchen Aktors nur 0,12-0,14% der Länge des Aktors im entladenen Zustand. Bei höheren Spannungen nimmt der Hub nur noch unterproportional zu. Dagegen werden dann die Feldstärken in den einzelnen Schichten der Piezokeramik, die üblicherweise 80 µm betragen, größer als 2 kV/m. Dieses könnte dann zu neuen Problemen wie elektrischen Spannungsdurchschlägen führen, die den Piezokeramik dann irreversibel schädigen würden.

Prinzipiell ist insbesondere bei direkt betriebenen Hochdruckeinspritzventilen ein großer Hub der Piezokeramik und damit der Ventilnadel erwünscht, da mit einem großen Hub auch eine große Einspritzmenge erzielt werden kann. Dieses wird  
5 beispielsweise bei besonders leistungsstarken oder Rennmotoren gefordert.

Bei indirekt betriebenen Einspritzventilen ist ein großer Hub der Ventilnadel insbesondere deswegen erwünscht, weil die  
10 Fertigungstoleranzen vergrößert werden können und dadurch Kostenvorteile erzielt werden können.

Zur Vergrößerung des Hubs der Ventilnadel wurde auch schon versucht, die Baulänge des Aktors zu vergrößern. Diese Lösung  
15 ist zwar wirkungsvoll, ist aber wegen des oben genannten geringen Elongationsfaktors der Piezokeramik relativ teuer.

Bekannt ist des weiteren, die Einspritzmenge durch einen möglichst langen Spannungsimpuls zu steuern. Die Länge des Einspritzimpulses bei einem Verbrennungsmotor ist aber durch die  
20 physikalischen Randbedingungen, insbesondere den optimalen Einspritzzeitpunkt, Abgasforderungen, Temperatur, Laufkultur usw. sehr begrenzt. Insbesondere bei der Mehrfacheinspritzung, bei der innerhalb eines Zyklusses bis zu fünf Injektionen in sehr kurzen Zeitabständen erfolgen, kann nur ein sehr  
25 kurzer Einspritzimpuls gewählt werden.

Bei bekannten Einspritzventilen wird häufig auch ein hydraulisches Element (hydraulisches Lager) als Spielausgleichselement verwendet, um parasitäre Spalten zu vermeiden. Dadurch  
30 kann der zur Verfügung stehende Hub des Aktors zu nahezu 100% auf die Ventilnadel übertragen werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren zum Betrieb eines hydraulischen Einspritzventils beziehungsweise das Steuergerät mit  
35 den kennzeichnenden Merkmalen der nebengeordneten Ansprüche 1 und 7 hat demgegenüber den Vorteil, dass die Elongation des

Aktors und damit der Hub des zu bewegenden Bauteils vergrößert werden kann, ohne dass die wirksame elektrische Feldstärke vergrößert werden muss. Durch die angelegte Biasspannung wird eine Schädigung des Aktors wirkungsvoll ausgeschlossen. Als besonders vorteilhaft wird dabei angesehen, dass an dem Einspritzventil selbst keine konstruktiven Änderungen vorgenommen werden müssen, so dass das erfindungsgemäße Verfahren generell an handelsübliche Einspritzventile angewendet werden kann. Darüber hinaus wird durch den vergrößerten Hub des zu bewegenden Bauteils in vorteilhafter Weise auch eine größere Einspritzmenge erzielt.

Durch die in den abhängigen Ansprüchen aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen des in den nebengeordneten Ansprüche 1 und 7 angeführten Verfahrens beziehungsweise der Steuerschaltung gegeben. Als besonders vorteilhaft wird dabei angesehen, dass der Betrag der Biasspannung kleiner ist als der Betrag einer solchen Spannung, die zu einer Umpolung des Aktors führen würde. Denn durch Anlegen der Biasspannung verkürzt sich der Aktor in diesem Spannungsbereich, so dass beim Anlegen der Steuerspannung diese Verkürzung als zusätzliche Elongation des Aktors genutzt werden kann.

Da wegen des hydraulischen Elementes im Einspritzventil die zusätzliche Elongation des Aktors praktisch vollständig auf das zu bewegende Bauteil übertragen wird, ergibt sich in vorteilhafter Weise dessen größerer Hub, ohne dass am Einspritzventil mechanische Änderungen vorgenommen werden müssen.

Ein weiterer Vorteil wird auch darin gesehen, dass durch die Biasspannung auch eine Reduzierung des Energieverbrauchs erreicht werden kann. Durch Verschiebung der Steuerspannung in den teilweise negativen Bereich verringert sich der Energieaufwand, da dieser physikalisch gesehen proportional mit dem Quadrat der Spannung ansteigt.

Eine günstige Lösung wird auch darin gesehen, die Steuerspannung unter Nutzung der Biasspannung zur Einstellung eines definierten Hubs des zu bewegendenden Bauteils zu nutzen. Durch den definierten Hub kann auf einfache Weise beispielsweise eine in einen Verbrennungsmotor einzuspritzende Kraftstoffmenge vorteilhaft gesteuert werden, ohne dass die Länge der Einspritzimpulse variiert werden muss. Die Einspritzmenge kann somit auf sehr einfache Weise über die Amplitude der Steuerspannung und/oder der Biasspannung gesteuert werden.

Mit dem Steuergerät kann besonders vorteilhaft ein Einspritzventil gesteuert werden, mit dem Kraftstoff wie Benzin oder Diesel mit hohem Druck in einen Verbrennungsmotor eingespritzt werden soll. Mit dem Aktor lassen sich wegen der geringen Kapazitäten der PMA-Piezokeramik sehr viel kürzere Schaltzeiten erzielen als beispielsweise bei einem Magnetventil, so dass auch bei Mehrfacheinspritzungen sehr große Mengen bei genauer Dosierung des Kraftstoffs möglich sind.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, ein Verfahren zum Betrieb eines hydraulischen Einspritzventils mit einem piezoelektrischen Aktor beziehungsweise ein Steuergerät anzugeben, das große Durchflussmengen bewältigen kann. Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen der nebengeordneten Ansprüche 1 und 7 gelöst.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert.

Figur 1 zeigt ein Diagramm, in dem die Elongation eines piezoelektrischen Aktors in Abhängigkeit von der angelegten Steuerspannung schematisch dargestellt ist,

Figur 2 zeigt zwei Diagramme, wobei die eine Kurve die Elongation des Aktors ohne und eine zweite Kurve die Elongation unter Verwendung einer Biasspannung zeigt,

Figur 3a zeigt zwei Diagramme, in denen der Spannungsverlauf für einen Steuerimpuls über die Zeit aufgetragen ist,

Figur 3b zeigt zwei Diagramme, in denen der Hub der Ventilmadel über die Zeit aufgetragen ist,

Figur 4 zeigt schematisch ein Einspritzventil ohne Verwendung einer Biasspannung, bei dem das zu bewegende Bauteil (Ventilnadel) geschlossen ist,

10

Figur 5 zeigt den in Figur 3 dargestellten Fall unter Nutzung einer Biasspannung,

Figur 6 zeigt schematisch ein Einspritzventil ohne Biasspannung aber mit geöffneter Ventilmadel und

15

Figur 7 zeigt das erfindungsgemäße Einspritzventil mit geöffneter Ventilmadel unter Nutzung einer erfindungsgemäßen Biasspannung.

20

Zum besseren Verständnis der Erfindung wird zunächst an Hand der Diagramme in Figur 1 erläutert, wie sich auf Grund der physikalischen Gegebenheiten die Länge  $\Delta l_0$  eines Aktors in Abhängigkeit von einer angelegten Steuerspannung  $U$  ändert.

25

Die Länge eines PMA-Aktors hängt nicht nur von seinem äußeren elektrischen Feld entsprechend der angelegten Spannung ab, sondern auch von seiner elektrischen Vorgeschichte und seinem Polarisationszustand. Diese beiden Faktoren bestimmen in Verbindung mit dem angelegten äußeren elektrischen Feld die aktuelle Länge des PMA-Aktors. Die Erfindung zeigt nun, wie durch geschicktes Nutzen dieser Zusammenhänge der nutzbare Hub des Aktors vergrößert werden kann.

30

Als negative Spannung wird eine solche Spannung verstanden, deren Polarität entgegengesetzt ist zur Vorzugspolarisierung des Aktors. Entsprechend wirkt eine positive Spannung in Vorzugsrichtung des Aktors.

35

Das Diagramm der Figur 1 zeigt insgesamt vier Kurven a bis d, die bei Anlegen einer Spannung an einen beispielsweise 30 mm langen Aktor eine entsprechende Längenänderung oder Hub bewirken. Die Kurve a zeigt den bekannten Normalfall, bei dem entsprechend der Pfeilrichtung die Steuerspannung zunächst vom Wert 0V bis auf 160V hochgefahren wird. Der Hub beträgt hier typisch 0...50µm. Wird die Spannung wieder von 160V auf 0V zurückgefahren, ergibt sich der typische obere Hysteresebogen. Der Aktor zieht sich dabei wieder auf seinen ursprünglichen Länge zurück, entsprechend 0µm bei 0V. Allerdings geht nach Durchlaufen des Spannungszyklusses der Hub nicht sofort auf 0µm zurück. Auf diesen als langsames 'Kriechen' bekannten Effekt soll hier nicht näher eingegangen werden. Die Kurve a zeigt daher im Bereich des Nullpunktes eine Massierung von Messpunkten an.

Wir nun in einem zweiten Schritt entsprechend der dreieckförmigen Kurve b an den Aktor eine Spannung von 0V...-160V angelegt, dann ergibt sich entsprechend dem unteren Ast der Kurve b ein negativer Hub bis ca. -35µm, also ein Zusammenziehen des Aktors. Die Verkürzung des Aktors geht bis etwa -70V. Bei weiterer negativen Vergrößerung der Steuerspannung U beginnen die einzelnen Domänen des PMA-Aktors sich umzupolen, so dass bis -160V die Länge des Aktors zunimmt und sich wieder ein positiver Hub von ca. 50 µm einstellt (linker aufsteigender Ast der Kurve b). Wird nun die Steuerspannung von -160V auf 0V zurückgefahren, dann geht der Hub auch wieder auf 0 µm zurück.

Bei einem erneuten Durchlaufen des Spannungszyklusses von 0V...-160V und wieder zurück auf 0V ergibt sich die Kurve c, die spiegelbildlich zur Kurve a verläuft.

In einem vierten Schritt wurde entsprechend der Kurve d die Steuerspannung U von 0V bis +160V hochgefahren, wodurch sich zunächst wieder eine weitere Verkürzung um ca. 35 µm bei ca. 70V des Aktors ergab (Kurve d, unterer Ast). Bei höherer



Spannung erfolgte wieder eine Umpolarisierung, so dass der Aktor sich wieder ausdehnt. Durch Zurückfahren der Spannung U auf 0V ergibt sich wieder die ursprüngliche Aktorlänge.

- 5 Die Erfindung nutzt nun den Bereich, in dem durch Anlegen einer Biasspannung UB der Aktor verkürzt wird. Der Betrag der Biasspannung UB ist dabei kleiner als der Wert der Spannung, die zu einer Umpolarisierung und damit zu einer Verlängerung führt. In unserem Beispiel kann die Biasspannung UB zwischen  
10 0 und bis fast -70V genutzt werden, bei umgedrehter Polarität entsprechend zwischen 0 und bis fast +70V. Erfindungsgemäß wird somit ein Hub von maximal 85 µm erzielt, während der Hub ohne Biasspannung UB nur 50 µm betragen würde. Des weiteren ist vorgesehen, über die Höhe der Biasspannung UB und/oder  
15 der Steuerspannung U die Elongation des Aktors und damit einen vorgegebenen Hub des zu bewegenden Bauteils zu steuern. Diese gezielte Steuerung der einzuspritzenden Kraftstoffmenge in einen Verbrennungsmotor ist besonders vorteilhaft.
- 20 Dieses angeführte Beispiel ist natürlich abhängig von der gewählten Piezokeramik und dem verwendeten Einsatzbereich, der auch temperaturabhängig sein kann. Aber vom Prinzip her ist eine merkliche Vergrößerung des Hubs durch Anlegen der Biasspannung UB immer möglich.
- 25 Die beiden Hysteresse-Kennlinien in dem Diagramm der Figur 2 zeigen nun, wie ein PMA-Aktor mit negativer Vorspannung (Biasspannung) betrieben werden kann. Die Kurve e zeigt zunächst einen bekannten Ansteuerzyklus, wie er bereits zur Kurve a in  
30 Figur 1 beschrieben wurde. Die Steuerspannung U wird wieder zwischen 0 und 160V gepulst. Der Hub beträgt ca. 38 µm maximal. Die Hysteresse-Kennlinie f zeigt nun, wie durch Einsatz einer Biasspannung UB=-30V der Hub auf ca. 48 µm vergrößert werden kann. Der nutzbare Hub konnte somit um 10 µm entsprechend  
35 chend 26% erweitert werden.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch eine Energiebe-  
trachtung für den Aktor. Der Energieverbrauch ist generell  
 $E=U^2 \cdot C/2$ , wobei C die zu ladende Kapazität des Aktors ist.  
Wird beispielsweise die Betriebsspannung bei gleichem Hub um  
5 nur 20V nach unten verschoben, also von  $U=0 \dots 160V$  auf  
 $U=-20 \dots 140V$ , dann verhalten sich sie beiden Energien wie  
 $(20^2 + 140^2)/160^2 = 0,78$ . Der Energiebedarf im verschobenen Be-  
reich ist also um ca. 22% niedriger als wenn keine Biasspan-  
nung verwendet wird.

10

Die Figuren 3a und 3b zeigen Diagramme, wie sie beispielswei-  
se für PMA-Aktoren (Injektoren) verwendet werden können, die  
zur Benzindirekteinspritzung geeignet sind. In Figur 3a zeigt  
die obere Kurve g eine Steuerspannung U im Bereich  $0 \dots 160V$ ,  
15 wie sie vom Stand der Technik her bekannt ist. Die untere  
Kurve h zeigt eine erfindungsgemäße Ansteuerkurve mit einer  
Biasspannung  $U_B = -20V$ , so dass die Steuerspannung U einen Zyklus  
zwischen  $-20V$  und  $+160V$  durchläuft.

20

In Figur 3b wurden die entsprechenden Hubkurven für das zu  
bewegende Bauteil dargestellt. Die untere Kurve k entspricht  
der Steuerspannung nach Kurve g in Figur 3a. Die obere Kurve  
i zeigt einen vergrößerten Hub, wie er erfindungsgemäß ent-  
sprechend der Kurve h in Figur 3a erwartet wurde. Der Hub ist  
25 also in diesem Ausführungsbeispiel um ca. 15% vergrößert wor-  
den, wobei die Belastung für den Aktor nur minimal anstieg,  
da das untere Spannungsniveau auf  $-20V$  gelegt wurde. Mit der  
Erfindung wurde somit ein doppelter Vorteil erzielt: der Hub  
wurde vergrößert, obgleich die Belastung für den Aktor nahezu  
30 konstant blieb.

Zur weiteren Veranschaulichung der Erfindung werden an Hand  
der Figuren 4 bis 7 die Auswirkungen der Biasspannung  $U_B$  an  
einem Einspritzventil 1 (Injektor) erläutert, wie er bei-  
35 spielsweise für die Kraftstoffeinspritzung in einen Verbren-  
nungsmotor Verwendung findet. Bei den dargestellten Ein-  
spritzventilen wurde aus Übersichtlichkeitsgründen nur ein

einfaches hydraulisches Hochdruckventil dargestellt, das beispielsweise für die Benzineinspritzung verwendet werden kann. Die Darstellungen sind nicht maßstabsgetreu, sondern wurden teilweise vergrößert dargestellt, da sich die Längenänderungen des Aktors in der Praxis nur im  $\mu\text{m}$ -Bereich bewegen.

Figur 4 zeigt zunächst das per se bekannte Einspritzventil 1 mit einem Aktor 2, einem hydraulischen Element 9 und einem zu bewegendem Bauteil 3, die in einem gemeinsamen Gehäuse 8 angeordnet sind. Das zu bewegendem Bauteil 3 ist in diesem Fall als Ventilnadel ausgebildet, die sich bei Elongation des Aktors 3 nach unten öffnet. Im Ruhezustand, d.h. ohne Steuerungspannung U wird der Ventilkopf durch eine Rückstellfeder 5 gegen eine Auslassöffnung gepresst, so dass diese geschlossen wird. Der Aktor 2 ist des weiteren mit dem Schaft der Ventilnadel 3 fest verbunden. Sein oberes Ende steht mit einem hydraulischen Element 9 in Verbindung, das über eine Leckspalte von einer Kraftstoff-Hochdruckleitung 7 befüllt werden kann. Das hydraulische Element 9 wirkt hier als hydraulisches Lager, das gegenüber der Entladungszeit des Aktors 2, die 1 bis 5 ms betragen kann; eine sehr lange Zeitkonstante aufweist. Gegenüber dem Gehäuse 8 sind die beweglichen Teile mit einem Balg entsprechend abgedichtet. Die Spannungsversorgung für den Aktor 2 erfolgt über Leitungen 4. Die gepulste Steuerungspannung U wird dabei von 0V auf einen gewünschten Wert, zum Beispiel +160V geschaltet und nach Ablauf einer vorgegebenen Pulsdauer wieder auf 0V zurückgeschaltet (vgl. Figur 3a).

Bei dem bekannten Einspritzventil 1 hat das hydraulische Lager 9 einen Flüssigkeitspegel  $h_0$ , der sich über die Leckspalte langsam ändern kann. Der Aktor 2 weist im Ruhezustand die Länge  $l_0$  auf. Beim Anlegen der Steuerungspannung  $U=160\text{V}$  öffnet sich die Ventilnadel 3 entsprechend der Kurve k (vgl. Figur 3b).

Alternativ ist jedoch auch vorgesehen, durch konstruktive Umgestaltung des Injektors 1 die Ventilnadel 3 nach innen zu

öffnen. Auch kann insbesondere für die Dieseleinspritzung, bei der noch höhere Drücke erzeugt werden, der Injektor 3 mit einem Servoventil ausgebildet sein, wobei das Servoventil auf ein hydraulisches Element wirkt, das dann als hydraulischer Übertrager ausgebildet ist.

Die verschiedenen Typen von Einspritzventilen sind per se bekannt, so dass deren Funktion nicht näher erläutert werden muss.

An Hand der Figur 5 wird nun die Wirkungsweise der Erfindung erläutert, wenn sie bei einem Einspritzventil 1 gemäß der Figur 4 angewendet wird. Die Bezeichnungen sind wieder die gleichen, wie sie in Figur 4 beschrieben wurden. Jetzt wird jedoch an den Aktor 2 mit Hilfe eines Steuergerätes 10 eine Biasspannung UB angelegt, die eine der Polungsrichtung des Aktors 2 entgegengesetzte Polarität aufweist. In diesem Beispiel sei die Vorzugspolarisierung in der Piezokeramik positiv gerichtet, so dass die Biasspannung  $UB < 0V$  ist, beispielsweise  $-30V$ . Als Folge dessen verkürzt sich der Aktor 2 auf die Länge  $l_0 - \delta$ . Das hydraulische Lager 9 füllt sich langsam um die Längendifferenz  $\delta$ , bis das hydraulische Lager 9 die Höhe  $h_0 + \delta$  einnimmt. In diesem Zustand verharret der Aktor 2, bis das Steuergerät 10 eine positive Steuerspannung U erzeugt, die eine entsprechende Elongation des Aktors 2 bewirkt.

Die beiden Figuren 6 und 7 zeigen im Vergleich die Wirkungsweise bei der bekannten Ansteuerung (Figur 6) und der erfindungsgemäßen Ansteuerung (Figur 7).

Entsprechend der Figur 6 ändert sich nun beim Anlegen der Steuerspannung  $U = 160V$  die Länge  $l_0$  des Aktors 2 um den Hub  $\Delta l_0$ . In der Realität beträgt der Hub  $\Delta l_0$  nur ca. 0,13% der Länge  $l_0$  und ist hier stark vergrößert dargestellt worden. Das hydraulische Lager 9 behält im wesentlichen seine Höhe  $h_0$  bei. Die kleinen Verluste durch Spaltströmung fallen wegen

der kurzen Betriebszeit von typisch 1...5 ms praktisch nicht ins Gewicht. Wegen der festen Verbindung mit der Ventilnadel 3 wird das Ventil ebenfalls um den Hub  $\Delta l_0$  geöffnet.

5 Figur 7 zeigt nun das erfindungsgemäße Verfahren, bei dem eine Biasspannung UB an das Einspritzventil 1 angelegt wurde, die den Aktor 2 verkürzt hat. Dieser Fall wurde zuvor zu Figur 5 erläutert. Wird nun - ausgehend von der negativen Biasspannung UB - vom Steuergerät 10 ebenfalls die Steuerspannung  
10  $U=160V$  angelegt, dann ändert sich die Länge des Aktors 2 auf den Wert  $\Delta l_0 + \delta$ . Damit wird auch der Hub der Ventilnadel 3 auf den Wert  $\Delta l_0 + \delta$  erhöht und erreicht gegenüber dem bekannten Verfahren eine deutliche Vergrößerung. Die Höhenänderung  $\delta$   
15 des hydraulischen Lagers 9 wird fast vollständig auf den Nadelhub übertragen, wenn man Effekte zweiter Ordnung, beispielsweise die leicht veränderte Steifigkeit des hydraulischen Lagers als Folge der Höhenänderung vernachlässigt. Auf  
jeden Fall ist der erfindungsgemäße Nadelhub  $\Delta l_0 + \delta$  immer größer als beim Stand der Technik.

20

Figur 7 zeigt eine idealisierte Momentaufnahme für den Zustand unmittelbar nach dem Öffnen des Injektors 2. Auf Dauer entleert sich das hydraulische Lager 9 und driftet langsam zurück. Daher sollte die Festlegung der Zeitkonstanten an die  
25 realen Gegebenheiten möglichst exakt angepasst werden. Für das erfindungsgemäße Verfahren hat diese Abstimmung jedoch keine grundsätzliche Bedeutung.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Betrieb eines Einspritzventils, das wenigstens einen piezoelektrischen Aktor (2), ein zu bewegendes Bauteil (3) und ein hydraulisches Element (9) aufweist, die in einem gemeinsamen Gehäuse (8) angeordnet sind, wobei durch Anlegen einer Steuerspannung (U) an den Aktor (2) der Hub des zu bewegendes Bauteils (3) reversibel steuerbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass der Aktor (2) mit einer Biasspannung (UB) vorgespannt wird, wobei die Biasspannung (UB) eine der Polungsrichtung des Aktors (2) entgegengesetzte Vorspannung aufweist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Betrag der Biasspannung (UB) kleiner ist als der Betrag einer solchen Spannung, die zu einer Umpolung des Aktors (2) führen würde.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Biasspannung (UB) zur Vergrößerung des Hubs ( $\Delta l_0$ ) des zu bewegendes Bauteils (3) verwendet wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Biasspannung (UB) derart bestimmt wird, dass eine Reduzierung des Energieverbrauchs für den Aktor (2) eintritt.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerspannung (U) unter Nutzung der Biasspannung (UB) zur Einstellung eines definierten Hubs ( $\Delta l_0 + \delta$ ) des zu bewegendes Bauteils (3) vorgegeben wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass mit dem definierten Hub ( $\Delta l_0 + \delta$ ) des zu bewegendes Bauteils (3) die Einspritzmenge bestimmt wird.

7. Steuergerät zur Erzeugung einer Steuerspannung (U) für ein Einspritzventil (1), das wenigstens einen piezoelektrischen Aktor (2), ein zu bewegendes Bauteil (3) und ein hydraulisches Element (9) aufweist, die in einem gemeinsamen Gehäuse (8) angeordnet sind, wobei durch Anlegen der Steuerspannung (U) an den Aktor (2) der Hub ( $\Delta l_0$ ) des zu bewegendes Bauteils (3) reversibel steuerbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass das Steuergerät (10) eine Biasspannung (UB) erzeugt, durch die der Aktor (2) vorgespannt ist und die der Polungsrichtung des Aktors (2) entgegengesetzt ist und dass die Steuerspannung (U) ausgebildet ist, den Hub ( $\Delta l_0$ ) des zu bewegendes Bauteils (3) unter Nutzung der Biasspannung (UB) zu vergrößern.
8. Steuergerät nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Betrag der Biasspannung (UB) kleiner ist als der Betrag einer solchen Spannung, die zu einer Umpolung des Aktors (2) führen würde.
9. Steuergerät nach einem der Ansprüche 7 oder 8, gekennzeichnet durch eine Verwendung an einem Einspritzventil (1) für die Kraftstoffeinspritzung in einen Benzinmotor.
10. Steuergerät nach einem der Ansprüche 7 oder 9, gekennzeichnet durch eine Verwendung an einem Einspritzventil (1) für die Kraftstoffeinspritzung in einen Dieselmotor.

1/4

FIG 1

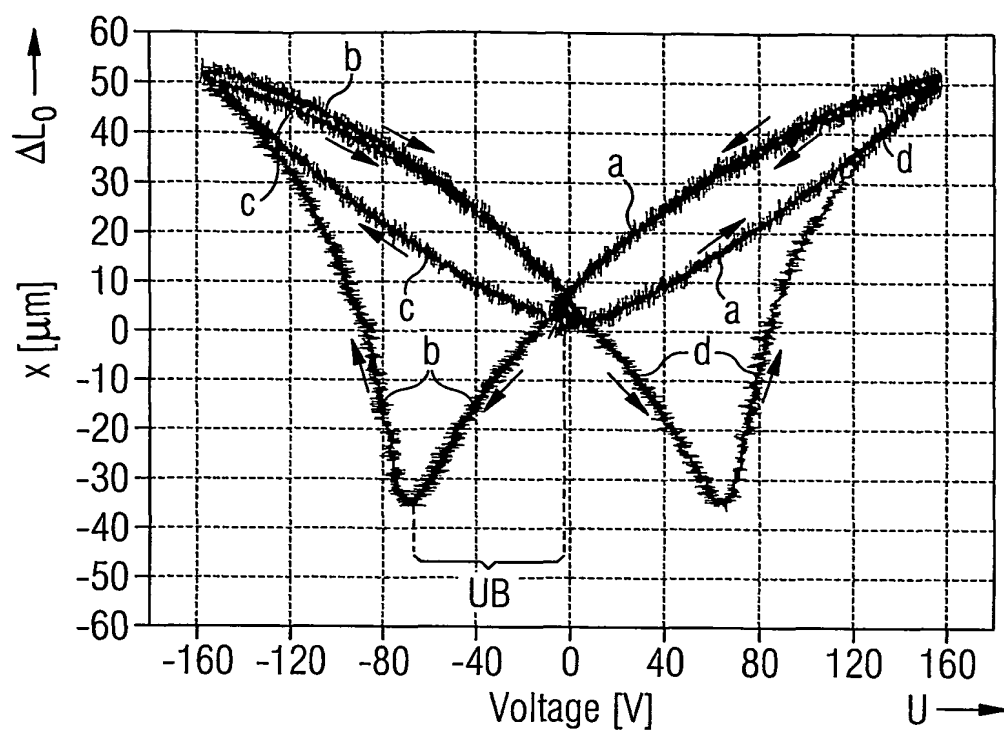


FIG 2

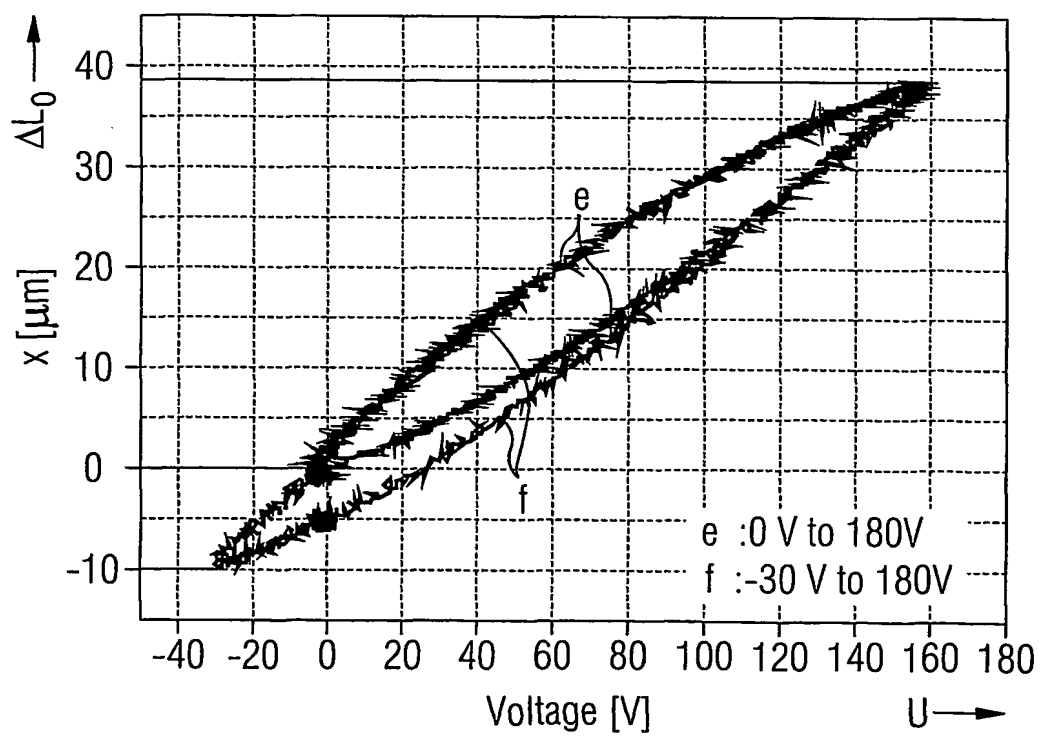




FIG 3A

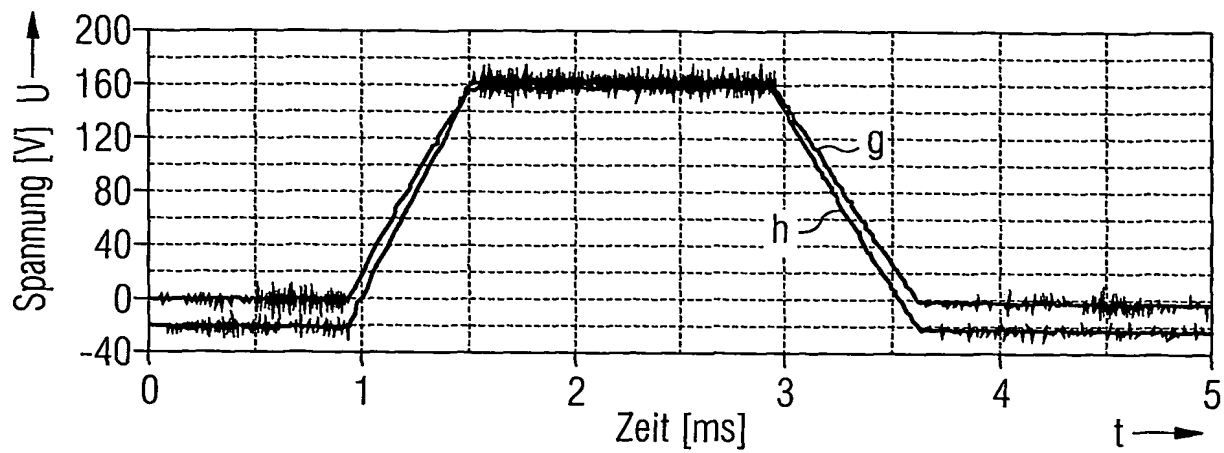
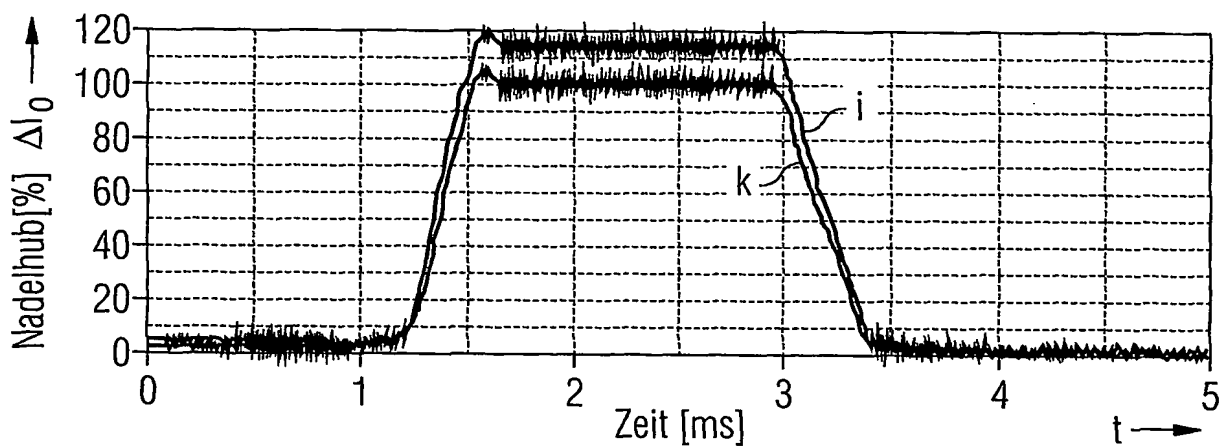
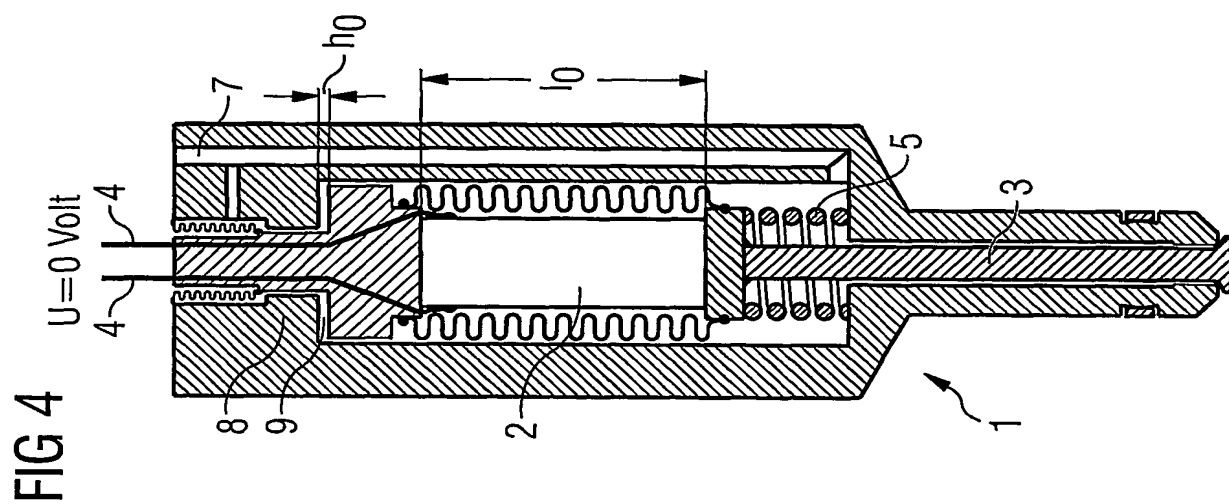
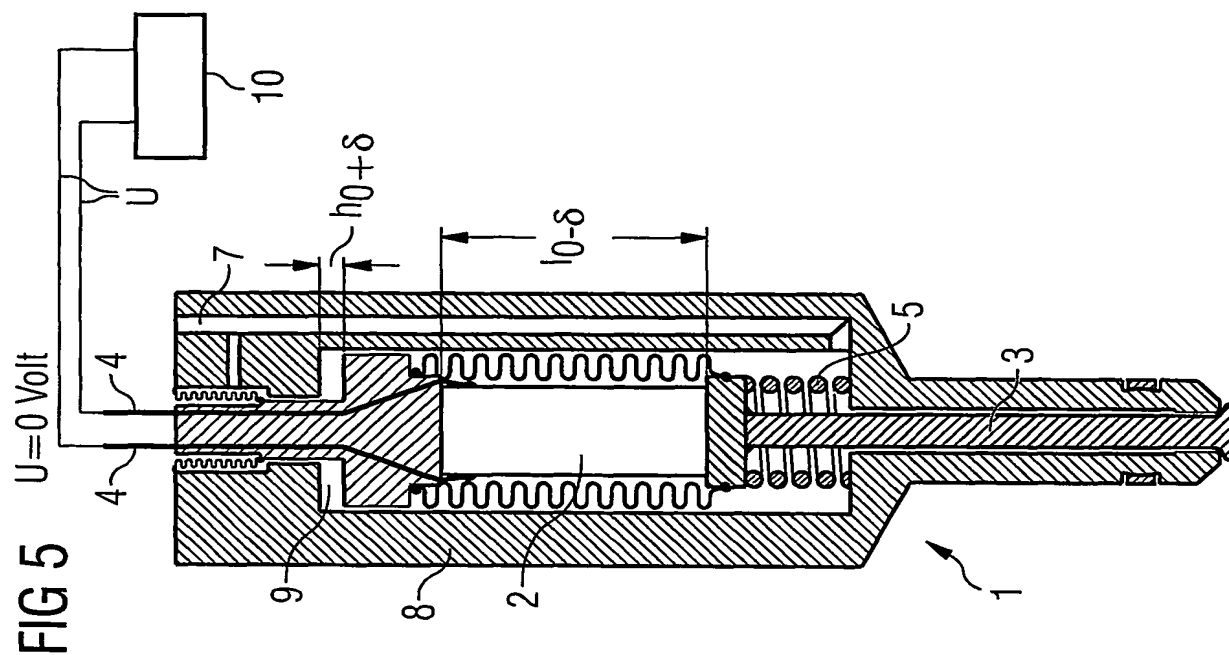


FIG 3B





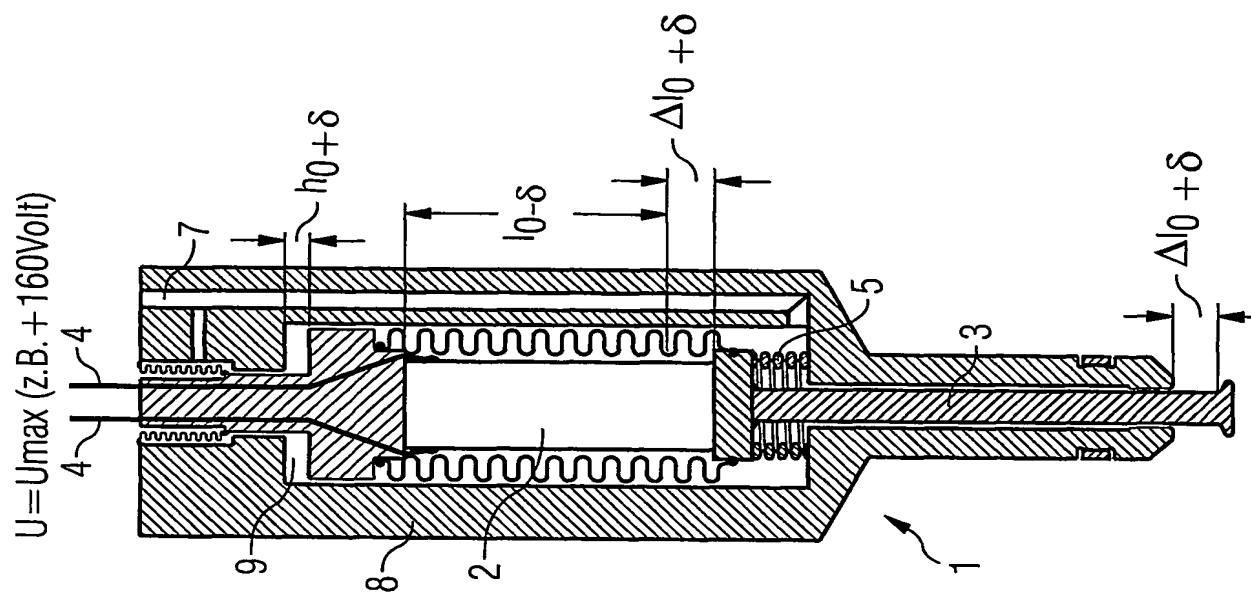
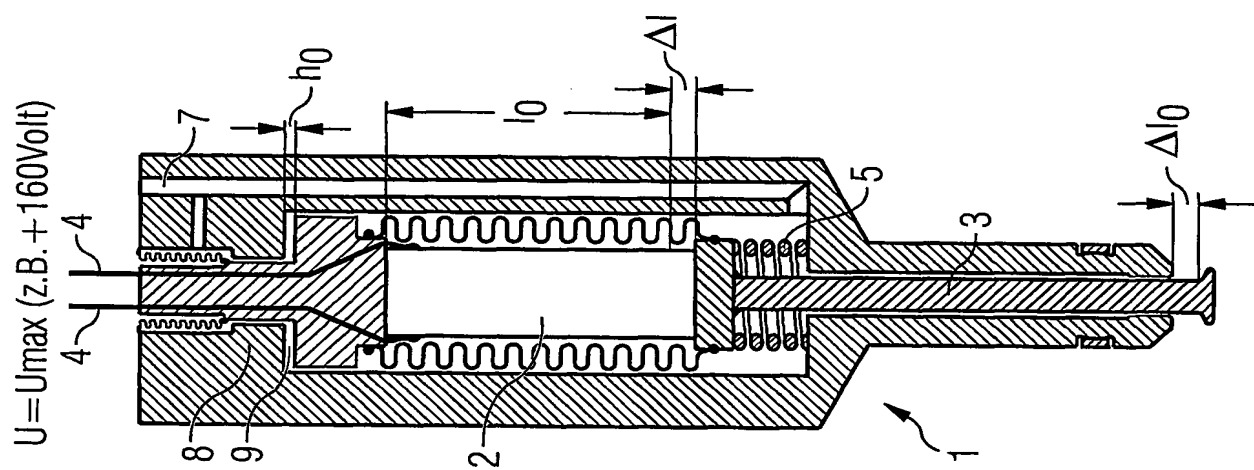


FIG 7



**FIG 6**

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Int. Application No.

PCT/DE 03/02931

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
IPC 7 F02D41/20

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 F02D F02M

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 39 35 937 A (TOYOTA MOTOR CO LTD) 3 May 1990 (1990-05-03) column 6, line 21 -column 7, line 41; figures 3A,9H	1-10
A	EP 1 079 158 A (SIEMENS AG) 28 February 2001 (2001-02-28) abstract	1-10
X	US 5 036 263 A (NAKAMORI YASUTAKA ET AL) 30 July 1991 (1991-07-30) column 1, line 51 - line 57 column 5, line 51 -column 6, line 23; figures	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.☒ Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 November 2003

Date of mailing of the international search report

04/12/2003

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Torle, E

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/JP03/02931

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)		Publication date
DE 3935937	A	03-05-1990	JP	2119652 A		07-05-1990
			JP	2935499 B2		16-08-1999
			DE	3935937 A1		03-05-1990
EP 1079158	A	28-02-2001	DE	19940056 A1		22-03-2001
			EP	1079158 A2		28-02-2001
US 5036263	A	30-07-1991	JP	2129975 A		18-05-1990
			JP	2754610 B2		20-05-1998

## INTERNATIONALER RESEARCHENBERICHT

In ... Aktenzeichen

PCT/...03/02931

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
IPK 7 F02D41/20

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RESEARCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
IPK 7 F02D F02M

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der Internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 39 35 937 A (TOYOTA MOTOR CO LTD) 3. Mai 1990 (1990-05-03) Spalte 6, Zeile 21 - Spalte 7, Zeile 41; Abbildungen 3A, 9H	1-10
A	EP 1 079 158 A (SIEMENS AG) 28. Februar 2001 (2001-02-28) Zusammenfassung	1-10
X	US 5 036 263 A (NAKAMORI YASUTAKA ET AL) 30. Juli 1991 (1991-07-30) Spalte 1, Zeile 51 - Zeile 57 Spalte 5, Zeile 51 - Spalte 6, Zeile 23; Abbildungen	1-10

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

26. November 2003

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

04/12/2003

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Torle, E

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die derselben Patentfamilie gehören

Inte  Aktenzeichen

PCT/DE 03/02931

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 3935937 A	03-05-1990	JP 2119652 A	07-05-1990
		JP 2935499 B2	16-08-1999
		DE 3935937 A1	03-05-1990
EP 1079158 A	28-02-2001	DE 19940056 A1	22-03-2001
		EP 1079158 A2	28-02-2001
US 5036263 A	30-07-1991	JP 2129975 A	18-05-1990
		JP 2754610 B2	20-05-1998

10/533813

JCO6 Rec'd PCT/PIG 02 MAY 2005

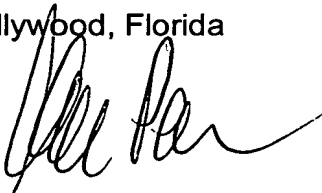
Docket No.: S4-02P13029

CERTIFICATION

I, the below named translator, hereby declare that: my name and post office address are as stated below; that I am knowledgeable in the English and German languages, and that I believe that the attached text is a true and complete translation of the International Patent Application PCT/DE2003/002931, filed September 3, 2003 and published as WO 2004/040112 A1.

I hereby declare that all statements made herein of my own knowledge are true and that all statements made on information and belief are believed to be true; and further that these statements were made with the knowledge that willful false statements and the like so made are punishable by fine or imprisonment, or both, under Section 1001 of Title 18 of the United States Code and that such willful false statements may jeopardize the validity of the application or any patent issued thereon.

Hollywood, Florida



---

Carmen Panizzi

May 2, 2005

Lerner and Greenberg, P.A  
P.O. 2480  
Hollywood, FL 33022-2480  
Tel.: (954) 925-1100  
Fax.: (954) 925-1101



10/533813

JCO6 Rec'd PCT 00 J2 MAY 2005

THIS DOCUMENT FORMS THE BASIS  
FOR THE PRELIMINARY AMENDMENT.

## Description

Method for operating a hydraulic injection valve having a piezoelectric actuator and a control unit

5

The invention relates to a method for operating a hydraulic injection valve (injector) embodied having at least one piezoelectric actuator, a displaceable component and a hydraulic element, all of which are disposed in a common housing, wherein the stroke of said displaceable component can be reversibly controlled through the application of a drive voltage to the actuator, or relates, as the case may be, to a control unit of the kind cited in the independent claims 1 and 7. The use of a piezoelectric actuator operated by means of a drive voltage that corresponds to its polarization direction for controlling an injection valve, in particular for injecting fuel into an internal combustion engine, is already known. In order, for example, to directly actuate a valve needle of the injection valve, use is here made of the linear expansion which the actuator undergoes owing to the applied drive voltage. In the case of indirect use, the valve needle is by contrast opened through the impact of a shut-off valve (servo valve).

10  
15  
20

The linear expansion (elongation) is by dint of the underlying physical principle a very small quantity. To achieve a useful linear expansion, multilayer actuators such as PMAs (piezoelectric multilayer actuator), for example, have been developed and the applied drive voltage selected to be as high as possible, for example 160V. The linear expansion of an actuator of said type is nevertheless only 0.12% to 0.14% of the length of the actuator in the discharged condition. The stroke increases less than proportionally when higher voltages are applied. The field strengths in the individual layers of

25  
30

the piezoceramic, customarily 80  $\mu\text{m}$  thick, by contrast then exceed 2 kV/m. This could then lead to new problems such as electric voltage punctures that would irreversibly damage the piezoceramic.

5

A large piezoceramic stroke, and hence valve needle stroke, is basically desirable particularly in the case of directly operated high-pressure injection valves since a large volume of injected material can also be achieved with a large stroke.

10 This is a requirement in the case of, for instance, particularly powerful engines or racing engines.

A large valve needle stroke is desirable in the case of indirectly operated injection valves particularly because  
15 production tolerances can be increased with cost advantages being achieved thereby.

Attempts have also already been made to increase the actuator's overall length with the aim of increasing the valve needle  
20 stroke. Effective though this solution is, the piezoceramic is relatively expensive owing to the above-cited small elongation factor.

It is furthermore known how to control the volume of injected  
25 material by means of a voltage pulse that is as long as possible. The length of the injection pulse is, however, very constrained in the case of an internal combustion engine by the physical boundary conditions, in particular by the optimal injection instant, exhaust gas requirements, temperature,  
30 engine-running culture etc. Only a very short injection pulse can be selected especially in the case of multiple injection where up to five injections take place in a single cycle at very short intervals.

With known injection valves a hydraulic element (hydraulic bearing) is frequently also used as the play-compensating element for the purpose of avoiding parasitic gaps. The  
5 available actuator stroke can thereby be transmitted virtually to its full extent to the valve needle.

By contrast, the method according to the invention for operating a hydraulic injection valve or, as the case may be,  
10 the control unit having the characterizing features of the independent claims 1 and 7 offers the advantage that the elongation of the actuator and hence the stroke of the displaceable component can be increased without the need to increase the effective electric field strength. Damage to the  
15 actuator is effectively precluded by the applied bias voltage. It is seen as particularly advantageous here that no physical design changes are needed on the injection valve itself so that the method according to the invention can be applied generally to commercially available injection valves. A larger volume of  
20 injected material is moreover also advantageously achieved on account of the increased stroke of the displaceable component.

Advantageous developments of and improvements to the method cited in the independent claims 1 and 7 or, as the case may be,  
25 of and to the control circuit are provided by the measures cited in the dependent claims. It is seen as particularly advantageous here that the bias voltage is lower than a voltage that would result in changing the polarity of the actuator. This is because the actuator becomes shorter in this voltage  
30 range through the application of the bias voltage so that this shortening can be used as an additional elongation of the actuator when the drive voltage is applied.

Since owing to the hydraulic element in the injection valve the additional elongation of the actuator is transmitted virtually fully to the displaceable component, its stroke is advantageously larger without the need to make mechanical  
5 changes to the injection valve.

A further advantage is seen in the possibility also of achieving a reduction in energy consumption through the bias voltage. By displacing the drive voltage into the partially  
10 negative range energy consumption is reduced since, viewed in physical terms, this rises proportionally to the square of the voltage.

A favorable solution is also seen in using the drive voltage  
15 employing the bias voltage for the purpose of setting a defined stroke of the displaceable component. A volume of fuel requiring to be injected into an internal combustion engine, for example, can be advantageously controlled in a simple manner by the defined stroke without the need to vary the  
20 length of the injection pulses. The volume of injected material can thus be controlled in a very simple manner by way of the amplitude of the drive voltage and/or bias voltage.

An injection valve by means of which fuel such as gasoline or  
25 diesel is to be injected into an internal combustion engine under high pressure can be controlled particularly advantageously by means of the control unit. Owing to the low capacitances of the PMA piezoceramic, a very large number of switching times can be achieved with the actuator that are  
30 shorter than in the case of, for example, a solenoid valve, so that very large volumes are also possible in the case of multiple injections with precise fuel dosing.

The object of the invention is to disclose a method for operating a hydraulic injection valve having a piezoelectric actuator or, as the case may be, to disclose a control unit that can manage large rates of flow. Said object is achieved by means of the features of the independent claims 1 and 7.

An exemplary embodiment of the invention is shown in the drawing and is explained in more detail in the description that follows.

10

Figure 1 is a chart in which the elongation of a piezoelectric actuator is shown schematically as a function of the applied drive voltage,

15 Figure 2 shows two charts wherein one curve shows the elongation of the actuator without the use of a bias voltage and a second curve shows the elongation with the use of a bias voltage,

20 Figure 3a shows two charts in which the voltage curve for a control pulse is plotted over time,

Figure 3b shows two charts in which the valve needle stroke is plotted over time,

25

Figure 4 is a schematic of an injection valve where a bias voltage is not used and the displaceable component (valve needle) is closed,

30 Figure 5 shows the case presented in Figure 3 using a bias voltage,

Figure 6 is a schematic of an injection valve where a bias voltage is not used but where the valve needle is open, and

Figure 7 shows the injection valve according to the invention having an open valve needle and using a bias voltage according to the invention.

To better understand the invention it will first be explained with the aid of the charts in Figure 1 how owing to the physical conditions the length  $\Delta l_0$  of an actuator changes as a function of an applied drive voltage  $U$ . The length of a PMA actuator depends not only on its outer electric field in keeping with the applied voltage but also on its previous electric history and its polarization state. In conjunction with the applied outer electric field, these two factors determine the current length of the PMA actuator. The invention now shows how the useful stroke of the actuator can be increased through skillful use of these relationships.

A voltage whose polarity is opposed to the actuator's preferred polarization is understood to be a negative voltage. A positive voltage correspondingly acts in the actuator's preferred direction.

The chart in Figure 1 shows a total of four curves a to d which effect a corresponding linear expansion or stroke when a voltage is applied to an actuator that is, say, 30 mm long. Curve a shows the known standard case where the drive voltage is initially driven from a value of 0V to 160V as indicated by the direction of the arrow. The stroke is here typically 0...50  $\mu\text{m}$ . If the voltage is returned from 160V to 0V, the result will be the typical top hysteresis loop. The actuator returns in the process to its original length, accordingly 0  $\mu\text{m}$  at 0V.

However, the stroke does not return immediately to 0  $\mu\text{m}$  at the end of the voltage cycle. It is not the intention to deal in greater detail here with this effect known as slow 'creeping'. Curve a therefore displays an amassing of measuring points in the area of the zero point.

If a voltage 0V...-160V is then applied to the actuator in a second step according to the triangular curve b, the result in keeping with the lower branch of curve b will be a negative stroke of up to approximately -35  $\mu\text{m}$ , which is to say a contraction of the actuator. The shortening of the actuator continues up to approximately -70V. The individual domains of the PMA actuator begin to reverse their polarity as the drive voltage U further increases negatively so that the length of the actuator will increase up to a value of -160V and a positive stroke of approximately 50  $\mu\text{m}$  will be restored (left-hand rising branch of curve b). If the drive voltage is then returned from -160V to 0V, the stroke will also return to 0  $\mu\text{m}$ .

Another completion of the voltage cycle from 0V to -160V and back to 0V will produce curve c, whose course mirrors that of curve a.

In a fourth step the drive voltage U was driven from 0V to +160V according to curve d, the result of which was again initially a further shortening of the actuator by approximately 35  $\mu\text{m}$  at approximately 70V (curve d, lower branch). Polarity reversal again occurred at higher voltages so that the actuator expanded again. Returning the voltage U to 0V restored the original actuator length.

The invention makes use of the range within which the actuator is shortened by the application of a bias voltage  $U_B$ . The bias



voltage  $U_B$  is here lower than the voltage that results in polarity reversal and hence in elongation. In our example it is possible to use the bias voltage  $U_B$  between 0 and down to almost -70V, and correspondingly between 0 and up to almost +70V with reversed polarity. A stroke of up to 85  $\mu\text{m}$  is thus achieved according to the invention, while the stroke would only be 50  $\mu\text{m}$  without a bias voltage  $U_B$ . Provision is further made for controlling the elongation of the actuator and hence a predefined stroke of the displaceable component by way of the level of the bias voltage  $U_B$  and/or of the drive voltage  $U$ . Said targeted controlling of the volume of fuel to be injected into an internal combustion engine is especially advantageous.

The example given is naturally dependent on the selected piezoceramic and area of application used, which may also be temperature-dependent. However, a distinct increase in stroke is in principle always possible as the result of applying the bias voltage  $U_B$ .

The two hysteresis curves in the chart in Figure 2 show how a PMA actuator can be operated with a negative bias (bias voltage). Curve e first shows a known drive cycle as previously described in connection with curve a in Figure 1. The drive voltage  $U$  is again pulsed between 0 and 160V. The stroke is approximately 38  $\mu\text{m}$  at most. The hysteresis curve f shows how the stroke can be increased to approximately 48  $\mu\text{m}$  by applying a bias voltage  $U_B = -30\text{V}$ . The useful stroke could thus be increased by 10  $\mu\text{m}$ , equating to 26%.

It is also of interest here to consider the actuator's energy requirements. The energy consumption is generally  $E = U^2 \cdot C / 2$ , where  $C$  is the actuator's capacitance requiring to be charged. If, for example, the operating voltage is lowered by just 20V,

which is to say from  $U = 0 \dots 160V$  to  $U = -20 \dots 140V$ , with the same stroke, then the two energies will behave in the manner  $(20^2 + 140^2) / 160^2 = 0.78$ . The energy requirement in the displaced range is thus approximately 22% lower than when no bias voltage is applied.

Figures 3a and 3b show charts of the type that can be used for, for example, PMA actuators (injectors) which are suitable for direct gasoline injection. The top curve g in Figure 3a shows a drive voltage U in the range  $0 \dots 160V$  as is known from the prior art. The lower curve h shows a drive curve according to the invention having a bias voltage  $U_B = -20V$ , so that the drive voltage U passes through a cycle of between  $-20V$  and  $+160V$ .

The corresponding stroke curves for the displaceable component were shown in Figure 3b. The lower curve k corresponds to the drive voltage according to curve g in Figure 3a. The top curve i shows an increased stroke of the type expected according to the invention in keeping with curve h in Figure 3a. In this exemplary embodiment the stroke has therefore been increased by approximately 15%, with only a minimal load increase for the actuator since the lower voltage level was set to  $-20V$ . A twofold advantage can therefore be achieved by means of the invention: The stroke is increased although the load for the actuator remains virtually constant.

To further illustrate the invention, the effects of the bias voltage  $U_B$  on an injection valve 1 (injector), as used for, for example, injecting fuel into an internal combustion engine, are explained with the aid of Figures 4 to 7. For reasons of clarity, only a simple hydraulic high-pressure valve that can be used for, for instance, injecting gasoline has been shown

for the injection valves illustrated here. The illustrations are not true to scale; they are in part shown enlarged since the changes in the actuator's length are in practice only in the  $\mu\text{m}$  range.

5

Figure 4 first shows the injection valve 1 known per se having an actuator 2, a hydraulic element 9 and a displaceable component 3, all of which are disposed in a common housing 8. The displaceable component 3 is in this case embodied as a valve needle which opens downward with the elongation of the actuator 3. In the rest condition, which is to say without the application of a drive voltage  $U$ , the valve head is pressed against a discharge aperture by a resetting spring 5 so that said aperture is closed. The actuator 2 is furthermore permanently connected to the shaft of the valve needle 3. The top end of said actuator is in contact with a hydraulic element 9 which can be filled via a leakage gap from a high-pressure fuel line 7. The hydraulic element 9 here acts as a hydraulic bearing having a very long time constant compared to the discharge time of the actuator 2, which can be 1 to 5 ms. The displaceable parts are appropriately sealed against the housing 8 by means of a bellows. The actuator 2 is supplied with power via leads 4. The pulsed drive voltage  $U$  is switched during the powering process from 0V to a required value, for example +160V, and is switched back to 0V on completion of a pre-specified pulse duration (see Figure 3a).

30

In the known injection valve 1 the hydraulic bearing 9 has a fluid level  $h_0$  which can slowly change via the leakage gap. The actuator 2 is of length  $l_0$  in the rest condition. The valve needle 3 opens according to curve  $k$  when the drive voltage  $U = 160\text{V}$  is applied (see Figure 3b).

Alternative provision is however also made for opening the valve needle 3 inward through redesigning the injector 1. In particular for diesel injection, where even greater pressures are generated, the injector 3 can also be embodied having a servo valve, with said valve acting upon a hydraulic element then embodied as a hydraulic transmission system.

The various types of injection valves are known per se, so their functioning does not have to be explained further.

The mode of operation of the invention when used with an injection valve 1 according to Figure 4 will now be explained with reference to Figure 5. The designations are again the same as those used in Figure 4. A bias voltage  $U_B$  having a polarity opposing the polarization direction of the actuator 2 is now, however, applied to the actuator 2 with the aid of a control unit 10. Let it be assumed in this example that the preferred polarization in the piezoceramic is positively oriented so that the bias voltage  $U_B$  is  $<0V$ , for example  $-30V$ . As a result of this, the actuator 2 reduces its length to  $l_0 - \delta$ . The hydraulic bearing 9 slowly fills up by the difference in length  $\delta$  until the hydraulic bearing 9 assumes the height  $h_0 + \delta$ . The actuator 2 remains in this state until the control unit 10 generates a positive drive voltage  $U$  that effects a corresponding elongation of actuator 2.

The two Figures 6 and 7 compare the functioning in the case of the known drive (Figure 6) and in the case of the drive according to the invention (Figure 7).

According to Figure 6 the length  $l_0$  of the actuator 2 now changes by the stroke  $\Delta l_0$  when the drive voltage  $U = 160V$  is applied. The stroke  $\Delta l_0$  is in reality only approximately 0.13%

of the length  $l_0$  and is here shown greatly enlarged. The hydraulic bearing 9 substantially retains its height  $h_0$ . The small losses due to gap leakage are virtually negligible owing to the short operating time of typically 1...5 ms. The valve is  
5 likewise opened by the stroke  $\Delta l_0$  owing to its permanent connection to the valve needle 3.

Figure 7 shows the method according to the invention where a bias voltage  $U_B$  that has shortened the actuator 2 has been  
10 applied to the injection valve 1. This case was explained previously in connection with Figure 5. If, proceeding from the negative bias voltage  $U_B$ , the drive voltage  $U = 160V$  is likewise then applied by the control unit 10, the length of the actuator 2 will change to the value  $\Delta l_0 + \delta$ . The stroke of the  
15 valve needle 3 will hence also increase to the value  $\Delta l_0 + \delta$  and, compared to the known method, will exhibit a significant increase. The change in height  $\delta$  of the hydraulic bearing 9 will be transmitted almost completely to the needle stroke if second-order effects such as the slightly altered rigidity of  
20 the hydraulic bearing resulting from the change in height are ignored. The needle stroke  $\Delta l_0 + \delta$  according to the invention will in any event always be greater than in the case of the prior art.

25 Figure 7 shows an idealized snapshot of the condition immediately after the injector 2 has opened. The hydraulic bearing 9 empties over time and slowly drifts back. Specifying of the time constants should therefore be matched as precisely as possible to the real conditions. However, this harmonizing  
30 is of no fundamental significance for the method according to the invention.

## Claims

1. A method for operating an injection valve having at least one piezoelectric actuator (2), a displaceable component (3) and a hydraulic element (9), all of which are disposed in a common housing (8), wherein the stroke of said displaceable component (3) can be reversibly controlled through the application of a drive voltage (U) to said actuator (2), characterized in that said actuator (2) is biased with a bias voltage (UB), said bias voltage (UB) having a bias opposing the polarization direction of the actuator (2).
2. The method according to claim 1, characterized in that the bias voltage (UB) is lower than a voltage that would result in a change in the polarity of the actuator (2).
3. The method according to claim 1 or 2, characterized in that the bias voltage (UB) is used for the purpose of increasing the stroke ( $\Delta l_0$ ) of the displaceable component (3).
4. The method according to one of the preceding claims, characterized in that the bias voltage (UB) is determined in such a way that a reduction in the energy consumption occurs for the actuator (2).
5. The method according to one of the preceding claims, characterized in that the drive voltage (U) is specified employing the bias voltage (UB) for the purpose of setting a defined stroke ( $\Delta l_0 + \delta$ ) of the displaceable component (3).
6. The method according to claim 5, characterized in that the volume of injected material is determined by means of the defined stroke ( $\Delta l_0 + \delta$ ) of the displaceable component (3).

7. A control unit for generating a drive voltage (U) for an injection valve (1) having at least one piezoelectric actuator (2), a displaceable component (3) and a hydraulic element (9), all of which are disposed in a common housing (8), wherein the stroke ( $\Delta l_0$ ) of said displaceable component (3) can be reversibly controlled through the application of a drive voltage (U) to said actuator (2),, characterized in that said control unit (10) generates a bias voltage (UB) by which the actuator (2) is biased and which opposes the polarization direction of the actuator (2) and in that the drive voltage (U) is embodied to increase the stroke ( $\Delta l_0$ ) of the displaceable component (3) using said bias voltage (UB).

8. The control unit according to claim 7, characterized in that the bias voltage (UB) is lower than a voltage that would result in a change in the polarity of the actuator (2).

9. The control unit according to one of claims 7 or 8 characterized by a use in an injection valve (1) for injecting fuel into a gasoline engine.

10. The control unit according to one of claims 7 or 9 characterized by a use in an injection valve (1) for injecting fuel into a diesel engine.